UCS – Aula 04

Instrumentos Analógicos

1. Introdução

Apesar dos instrumentos digitais (mostrador em forma de dígitos) terem praticamente tomado conta do mercado, ainda existem muitos instrumentos analógicos (de ponteiro) nos laboratórios e indústrias que continuam a ser usados. Um instrumento analógico é aquele no qual o deslocamento angular de um ponteiro representa a magnitude da grandeza a ser medida; ou seja, ao invés de pintar uma escala de ângulos, uma calibração é usada de tal modo que o deslocamento angular é transformado no valor da grandeza a ser medida, por exemplo, voltagem, como mostra a fig. 1 .

Fig. 1 a - Instrumento analógico - escala de voltagem; (b) instrumento digital - escala de miliamperes (mA).

No caso dos instrumentos digitais, o instrumento responde mostrando num display (a maioria de cristal líquido) a grandeza medida; no caso dos instrumentos analógicos, é necessário que a grandeza a ser medida forneça ao medidor a energia necessária para deslocar as partes móveis (bobina, ponteiro,mola,..). O processo de medição, portanto, provoca uma perturbação na grandeza a ser medida (isso não ocorre só com grandezas elétricas; é uma

característica geral de todo e qualquer processo de medida). Uma vez que não se pode evitar a perturbação introduzida pelo instrumento medidor, procura-se minimizar esses efeitos, usando um instrumento que se comporte muito próximo de um instrumento “ideal” (que seria aquele que não interferiria na medida) , sempre que possível.

Classes dos Instrumentos

Geralmente os instrumentos analógicos vem com um índice de classe a fim de desisgnar sua exatidão.

Índice de Classe	Limites de erros
0,05	0,05%
0,1	0,1%
0,2	0,2%
0,5	0,5%
1,0	1,0%
1,5	1,5%
2,5	2,5%
5,0	5,0%

Os erros são sempre relativos ao fundo de escala sendo utilizado na medida.

Os instrumentos analógicos mais utilizados são: (a) bobina móvel (ou Dársonval) e o ferro móvel; instrumentos que obedecem outros princípios físicos não serão aqui abordados, por não serem tão importantes, como por exemplo: (c) eletrodinâmico, (d) termoelétrico, (e) efeito Hall .

O instrumento básico normalmente é um galvanômetro; acrescentando-se resistores em série (voltímetro), em paralelo (amperímetro), pilha (ohmímetro), etc..,, pode-se transformar o galvanômetro num multímetro, onde esses componentes e suas ligações são selecionados por uma chave adequada, de modo a permitir a leitura da grandeza de interesse.

Os galvanômetros do tipo ferro móvel são muito utilizados como ***instrumentos de painel*** ; são instrumentos de baixo custo mas em compensação sua precisão é ruim; por isso, são usados mais na indicação de faixas de trabalho ou simplesmente para saber se existe ou

não um sinal elétrico. Exemplo: num determinado equipamento industrial, precisa-se saber se existe ou não voltagem. Não importa se o valor indicado é 108, 105, 124. Sabe-se que o valor é em torno de 110V e que existe sinal elétrico. Seu emprego mais utilizado é nas classes 1 a 2,5.

Um dos princípios de funcionamento do instrumento tipo ferro móvel está mostrado na fig. 2; quando duas barras de ferro adjacentes são magnetizadas (através da corrente em uma bobina na qual as barras estão inseridas) de maneira uniforme, surge uma força de repulsão entre ambas uma vez que as duas adquirem a mesma polarização magnética. Usando uma das barras fixa e a outra móvel, e, adaptando-se um ponteiro na barra móvel, consegue-se, através de uma escala previamente calibrada, ler o valor da voltagem ou corrente aplicada na bobina. Além do sistema de repulsão por dois ferros ainda pode-se encontrar o sistema de atração do ferro para dentro da bobina, ou então um tipo combinado dos dois sistemas.

Esse tipo de instrumento pode ler voltagens ou correntes contínuas e alternadas, uma vez que, tratando-se de sinais alternados, mudando a polaridade da corrente na bobina, muda a polaridade do campo magnético, mas as duas barras irão magnetizarem-se novamente com polaridades iguais, promovendo-se a repulsão entre ambas novamente.

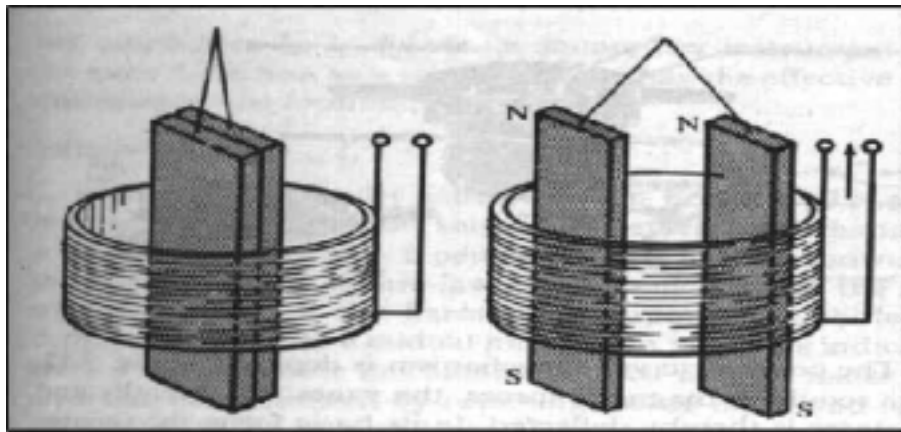



Fig. 2 - Galvanômetro tipo ferro móvel; resistores são conectados em série para transformá-lo num voltímetro, por exemplo.

Nos instrumentos do tipo ferro móvel, a deflexão do ponteiro é proporcional ao quadrado da corrente; assim, esse tipo de instrumento mede ***valor RMS***, também chamado de ***valor eficaz .*** Caso o sinal a ser medido tenha várias componentes de frequência (caracterizando um sinal mais complexo), esse instrumento, que lê valores que seguem uma

lei quadrática irá fornecer a mesma deflexão que uma função seno que tem valor eficaz expresso pela equação :

$$\text{Valor eficaz} = [\, i_1^2 + i_2^2 + i_3^2 + ...]^{1/2} \quad (1)$$

O mais utilizado instrumento analógico é o do tipo "bobina móvel", também chamado galvanômetro de D'Arsonval e o seu princípio de funcionamento está mostrado na fig. 3. Nesse instrumento, uma bobina retangular(a) está adaptada a um cilindro (b), que por sua vez está imerso em um campo magnético permanente, gerado por um imã (c).

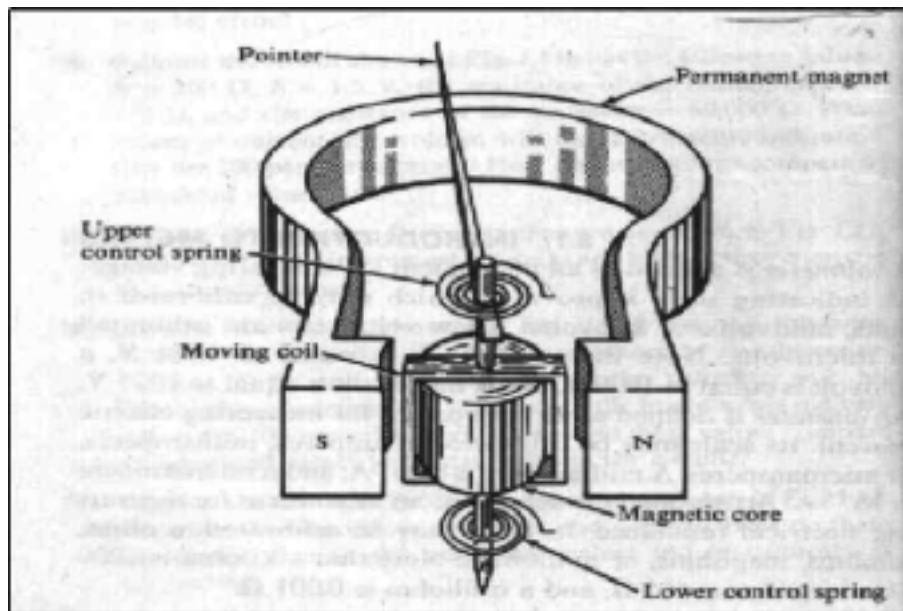
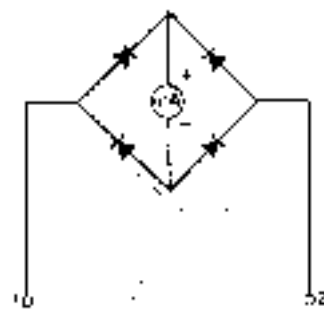
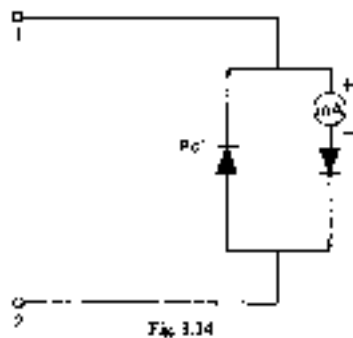



Fig. 3 - Galvanômetro de bobina móvel (D'Arsonval).

Quando uma corrente elétrica é aplicada na bobina (condutor) tem-se a interação entre essa corrente e o campo magnético gerado pelo imã; assim, caracteriza-se uma situação física por demais conhecida (mesmo efeito utilizado nos motores elétricos): condutor percorrido por corrente elétrica na presença de campo magnético. O resultado é o surgimento de força sobre o condutor; como a corrente elétrica muda de sentido em cada lado da bobina, a força também muda de sentido.

Como resultado, tem-se um conjugado (torque) atuando na bobina, que foi montada sobre um quadro-móvel. Assim, o quadro móvel, por sua vez, desloca um ponteiro indicador

na escala previamente calibrada, até onde permitem as molas espirais (para evitar danos). É importante frisar que, sem a passagem de corrente elétrica pela bobina, não existe a interação corrente x campo magnético, e , consequentemente o ponteiro ***não se move***. Por outro lado, mudando a polaridade da corrente, muda o sentido do movimento do ponteiro. É facil perceber que o valor lido no caso de um sinal senoidal (rede elétrica convencional de uma casa, por exemplo) é zero, ou seja, o instrumento lê ***valor médio*** e não valor eficaz como no caso do medidor tipo ferro móvel.

Retificador de ½ Onda (esquerda) e Onda Completa (direita).

Neste caso, o desvio do ponteiro é proporcional a corrente sendo aplicada na bobina. Os instrumentos de bobina móvel são apropriados para a medição de correntes muito pequenas (da ordem de 10 μA ou ainda menores). Em galvanômetros especiais para laboratório nos quais a suspensão do elemento é uma fita suspensa, constituídas estas por delgadas de ouro ou bronze fosforoso, tendo um ponteiro indicador de foco luminoso, podem ser obtidas sensibilidades de 10^{-12} A.

Apesar do galvanômetro do tipo bobina móvel perceber apenas sinais constantes, é possível a utilização do mesmo nas medidas de sianis AC. Isto é normalmente feito com a utilização de semicondutores retificadores (diodos). Com configurações adequadas é possível trasformar um sinal AC que possui excursão de –V a + V em sinais AC que tem excursão de 0 a V, resultando numa componente média diferente de zero, conforme mostram as figuras abaixo.

Os retificadores são chamados de ½ onda quando o semiciclo negativo é perdido e de onda completa quando o semiciclo negativo é apenas invertido.

O ***amperímetro*** é um instrumento que mede corrente elétrica (ligado em série); o instrumento seria *ideal* se a sua resistência interna fosse *zero*, isso é, se constituísse um *curto circuito* entre os pontos do circuito onde se pretende medir a corrente elétrica. O ***voltímetro*** é o instrumento que mede a diferença de potencial (voltagem) entre dois pontos quaisquer do circuito. No caso do voltímetro, o instrumento será ideal se a sua *resistência interna for infinita* frente à resistência onde está sendo medida a voltagem, isto é, se ele constituir um *circuito aberto* (não "puxa corrente").

Um voltímetro comum (fig. 4) pode ser construído a partir de um galvanômetro de bobina móvel, uma chave seletora e um conjunto de resistores; através da chave seletora os resistores são convenientemente colocados em série (para aumentar) com a resistência interna do galvanômetro. As diferentes combinações permitem o uso de diferentes escalas.

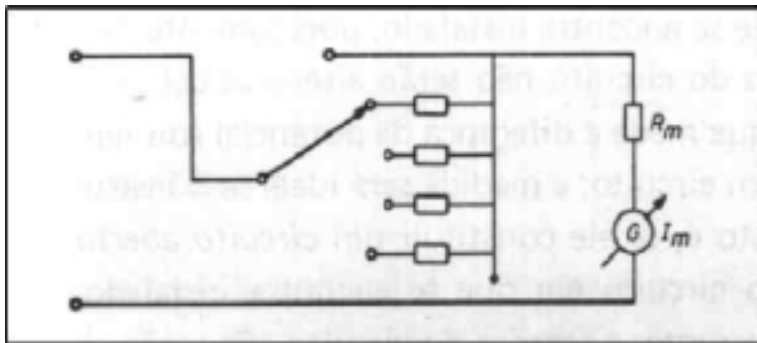



Fig. 4 - Voltímetro construído a partir de galvanômetro, chave seletora e resistores em série.

O amperímetro também utiliza um galvanômetro, uma chave seletora e resistores, só que, nesse caso, a chave seletora coloca os resistores em paralelo (fig. 5) com a resistência interna do galvanômetro; esses resistores são denominados comumente de **"shunts"** (desvios), permitindo dessa maneira a leitura de correntes elétricas maiores do que aquelas lidas exclusivamente pelo galvanômetro que normalmente são pequenas. A mudança de escala do instrumento deve ser feita sem que por ele circule corrente (desconecte um dos cabos da fonte de tensão, por exemplo), porque se a chave desconectar o shunt, toda a corrente circulará pelo galvanômetro, danificando-o .

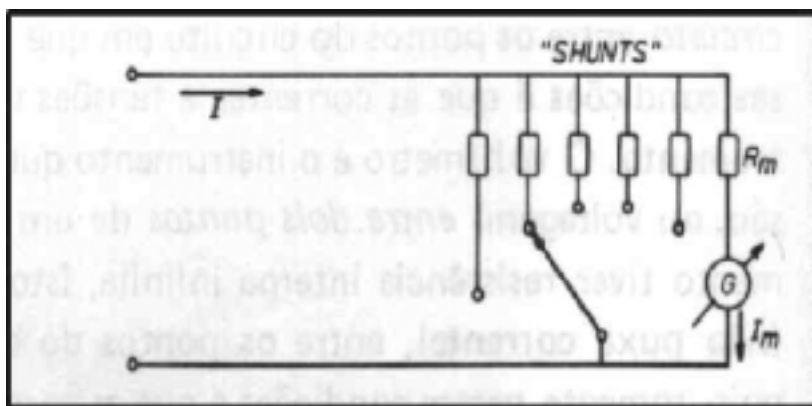



Fig. 5 - Amperímetro construído a partir de galvanômetro, chave seletora e resistores em paralelo (shunts).

O galvanômetro usado para construir voltímetros e amperímetros também pode ser usado para construir ohmímetros (medição de resistência elétrica - fig. 6a); caso o instrumento possua todas essas funções, é normalmente chamado de multímetro ou multitester. No caso do ohmímetro, além de eventuais resistores, é necessário que uma pilha ou bateria forneça voltagem constante e nesse caso, a corrente que circulará será inversamente proporcional à resistência (fig. 6b) que se pretende medir e que foi conectada aos terminais do instrumento.

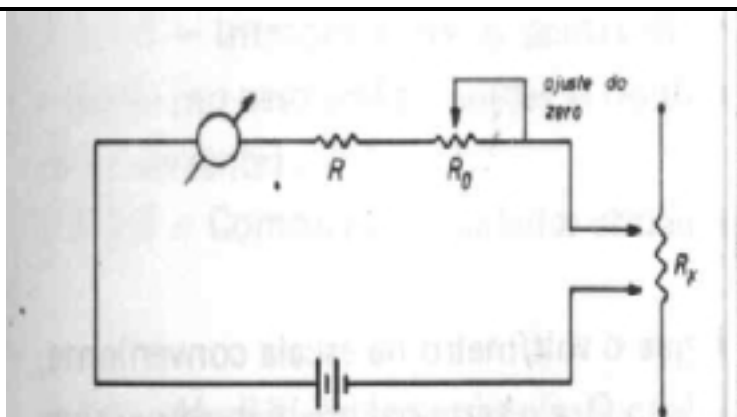



Fig. 6(a) - Ohmímetro construído a partir de galvanômetro, chave seletora, resistor variável e pilha ou bateria; (b) o zero da escala de corrente elétrica coincide com o máximo valor para a resistência elétrica (infinita), já que são inversamente proporcionais.

Mediante uma série de outros artifícios, estes aparelhos podem ser utilizados para medir outros parâmetros, como: temperatura, capacitância, decibéis, RPM, etc...Na chave seletora pode-se ler claramente a função, bem como a escala que está sendo usada. O instrumento de bobina móvel possui algumas características, dentre as quais pode-se

salientar; (a) sensibilidade; (b) precisão, (c) custo, (d) escalas para sinais CC e AC, etc... A sensibilidade é definida pelo inverso da corrente que causa a deflexão máxima do galvanômetro:

$$S = \frac{1}{i_{min}} \qquad (2)$$

onde i_{max} é a corrente que causa deflexão máxima no galvanômetro. A sensibilidade é fornecida, portanto, em Ω /V. Esse parâmetro costuma vir impresso no painel do instrumento e valores comuns são : 10.000 ΩV, 20.000 ΩV, 30.000 Ω/V, por exemplo. Quanto maior é a sensibilidade, maior é a qualidade do instrumento (e também o custo). Dentre outros aspectos, a sensibilidade pode ser usada para saber a resistência interna do multímetro, quando usado na escala de voltagem. Assim, um instrumento de S = 10.000 Ω/V, quando usado na escala de 10 V, terá uma resistência interna de 1000.000 Ω ; na escala de 2,5V terá uma resistência interna de 25.000 Ω , e assim por diante.

O erro na medição normalmente é fornecido em termos do fundo de escala e sempre deve-se consultar o manual do fabricante, porque esse erro varia em função do parâmetro a ser medido. Exemplo: um instrumento que tenha um erro de 3%, quando usado na escala de 10V e estiver fazendo a leitura de uma voltagem de 9 V. O valor correto da voltagem, com o respectivo erro será:

V = 9,0V ± 3% fundo de escala = 9,0V ± 3% de 10V = 9,0 V ± 0,3V. Ou seja:

V = (9,0 ± 0,3)V , ou ainda : V = 9,0V ± 6%.

Isso quer dizer,que o menor erro que o instrumento comete é quando está sendo feita uma medida que coincide com o valor do fundo de escala (10V). Em termos percentuais, qualquer outra medida (2V, 3V, 5V,..) sempre implicará num erro percentual maior do que 3%, a não ser na situação limite citada. Uma implicação direta dessa análise pode ser a seguinte: você dispõe de um instrumento de 5% fundo de escala (F.E.), com as seguintes escalas: 1V, 4V, 10V, e precisa medir uma voltagem de aproximadamente 2,0 V. Qual das escalas escolheria? Apesar de poder usar qualquer escala, com exceção da escala de 1V (por ser menor que a medida - o ponteiro passa do fundo de escala e pode danificar o instrumento, inclusive), essas escalas teriam erros percentuais diferentes para uma leitura da mesma voltagem (2,0V , no caso). Assim, analisando a medida e o erro em cada escala:

(a) escala de 4V

V = 2,0 V 5% de 4,0 V = (2,0 0,2)V = 2,0 V 10%

(b) escala de 10V

V = 2,0 V 5% de 10V = (2,0 0,5)V = 2,0V   20%

Consequentemente, a escala de 4V é a mais aconselhável, porque o erro percentual de leitura é menor (escala onde a deflexão do ponteiro é maior, e consequentemente está mais perto do fundo de escala).

O custo médio dos instrumentos de bobina móvel fica em torno dos U$ 30 no mercado nacional, dependendo do modelo, senbilidade, etc., e está sendo cada vez menos usado em virtude dos instrumentos digitais serem mais precisos e praticamente estarem competindo em preço. Já os indicadores do tipo ferro móvel são bem mais baratos pelos motivos já expostos: são instrumentos menos precisos, geralmente usados apenas como indicadores de painel.

Simbologia:

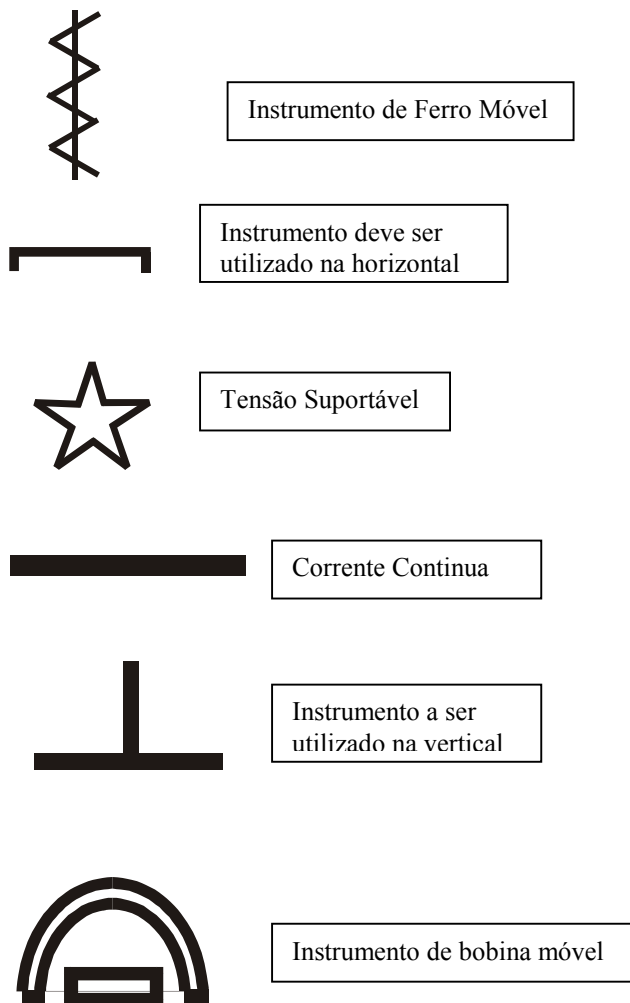



Fig. 7 – Símbolos de Instrumentos

O erro mais comum neste tipo e instrumento é o ero de paralaxe:

Quando a vista do observador, a ponta do ponteiro e o valor indicado na escala não se situam no mesmo plano

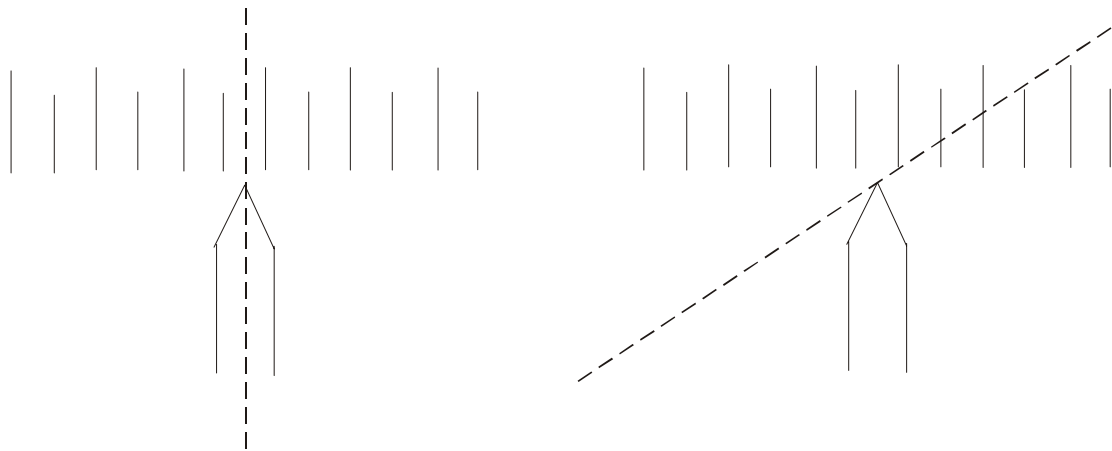



Fig. 8 – Erro de Paralaxe

Esta é a razão de se utilizar espelhos no fundo de escala.

Medição de Potência

A potência num circuito CC pode ser medido mediante um voltímetro e um amperímetro. Entretanto, além do inconveniente de realizar uma medida simultânea de dois instrumentos, um erro considerável (ao menos para potências baixas) inevitavelmente estará inserido.

O wattímetro é um instrumento capaz de realizar a medida da potência de consumo (potência útil) de uma carga. Este instrumento mede diretamente a potência dissipada numa carga sob tensão contínua, entretanto um problema pode ocorrer em circuitos AC.

Se a potência de uma carga resistiva estiver sendo medida, não existe defasagem entre o sinal de corrente e tensão, desta forma este ângulo denominado ângulo $\Phi = 0$ e o cos deste ângulo é 1. Diz-se então que o fator de potência é 1, e neste caso a potência utilizada é igual a potência entregue.

Se a carga for capacitiva ou indutiva (ou mista), existe uma defasagem entre o sinal de corrente e tensão e o cos do ângulo Φ é diferente de zero e assim a potência entregue é diferente da potência sendo utilizada (que é a indicada pelo wattímetro). As concessionárias normalmente sobretaxam fatores de potência abaixo do mínimo (aproximadamente 0,9).

Com isso, neste tipo de circuito é necessário ainda um instrumento para medir o ângulo Φ (conhecido como cossefímetro).

Portanto: **O wattímetro indica a potência útil !** e apesar do valor indicado pelo mesmo ser baixo (por exemplo), a corrente pode ser muito alta em casos onde o cos Φ é muito baixo, por isso, estes instrumentos possuem indicação dos limites de corrente e tensão.

Utilização de Técnicas Digitais em Instrumentos – Aquisição de dados via computador e uso do conversor AD – Instrumentos Digitais

Introdução

O interesse pelas calculadoras despertou quando a Matemática começou a ficar mais complicada; o cientista francês Blaise Pascal construiu, em 1640, um mecanismo com que se podia somar e subtrair. Cinqüenta anos mais tarde, Leibniz, a cujos estudos também devemos a criação do Cálculo Infinitesimal (junto com Newton), construiu uma máquina capaz de multiplicar e dividir. Todavia, fracassou no intuito de fabricar uma “máquina pensante”alimentada com números e símbolos.

As primeiras tentativas concretas de construir uma máquina capaz de decompor em pequenas fases, grandes operações de cálculo, foram obra do matemático inglês Charles Babage, cerca de 170 anos atrás. O seu “analytical engine” apresentava as características de uma moderna máquina de calcular: entrada e saída de dados em tiras de papel perfurado, grupos de funcionamento para registro, manipulação e operações de cálculo. Sessenta anos depois, Hermann Hollerith estudou as idéias de Babage e criou a técnica dos cartões perfurados ou sistema Hollerith, empregado até pouco tempo atrás. A sua programação, entretanto, era demorada e cansativa. Todavia, esta técnica desempenhou importante papel na administração, e o censo nacional dos EUA, em 1890, foi levado a bom termo graças a esta técnica.

As primeiras calculadoras autênticas, cujo funcionamento ainda não era eletrônico, mas eletromecânico, baseado no sistema de relé do tipo usado em telefonia, apareceram no

princípio dos anos 40, nos EUA (Subitz, Mark I e ASCC) e Alemanha (Z3, com números binários de Zuse). A técnica de relé parecia, entretanto, de grande perda de tempo e escassa capacidade de registro. O passo seguinte foi o ENIAC, computador a válvulas: tinha 15 metros de comprimento, 9 m de largura e 3m de altura. Continha 50.000 válvulas, consumia 100 KW e realizava operações simples em milésimos de segundo. Foi utilizado na balística e Física atômica, e previu com precisão o resultado da campanha presidencial em 1952, nos EUA. As válvulas eram sua maior desvantagem e o programa de cálculo era realizado com base em matrizes. Os computadores somente receberam grande difusão com o surgimento dos transistores, que substituíram as válvulas e as lentas memórias de tambor magnético cederam lugar para as rápidas memórias de ferrita. Na terceira geração de computadores, já se operava com circuitos integrados e memórias de chapas magnéticas e os tempos de processamento desceram aos bilionésimos de segundo.

Um computador não sabe contar até três; é incapaz de dirigir o nosso complicado sistema decimal. Serve-se do sistema binário, à base de zeros e uns (0 e 1) expresso em linguagem de máquina. Cada número binário constitui, para o computador, uma unidade informativa denominada na linguagem técnica de “bit”.

Os medidores digitais (um voltímetro, ou medidor de temperatura, ou multímetro, por exemplo) fornecem a leitura na forma de dígitos, como mostra a figura 4, ao invés de mostrar a grandeza em função da posição de um ponteiro numa escala .

Fig. 9 - Indicador digital de temperatura.

Uma das principais características da leitura digital é diminuir o erro de leitura (principalmente a componente humana); outra característica é a rapidez, além de evitar erros de paralaxe (que também pode ser incluído no erro humano). Um voltímetro digital pode ser considerado basicamente como um conversor analógico digital conectado a um circuito contador e uma unidade de visualização (display). Uma determinada voltagem a ser medida,

é amostrada durante um certo período de tempo e é convertida mediante o conversor A/D num sinal digital, isto é, uma série de impulsos com o número de impulsos indicando a amplitude da tensão analógica (assim como um sinal de formato qualquer pode ser expresso por uma série de Fourier: uma soma de senos e cossenos). Esses impulsos são contados pelo circuito contador e levado ao display para apresentação do resultado.

Comparação entre Sinais Analógicos e Sinais Digitais

Sinais analógicos são aqueles que podem assumir qualquer valor dentro de determinados limites e que levam a informação na sua amplitude. Os sinais analógicos podem ser classificados em (a) variáveis e (b) contínuos. Os sinais analógicos variáveis são aqueles que equivalem (podem ser decompostas) a uma soma de um conjunto de senóides de frequência mínima é maior que zero. Um exemplo típico são os sinais senoidais de frequência constante (Fig. 1a), que representam a informação através de sua amplitude. Os sinais analógicos contínuos podem ser decompostos numa soma de senóides cuja frequência mínima é zero. Ou seja, trata-se de um sinal que tem um certo nível fixo durante um tempo indefinido (Fig. 1b) .

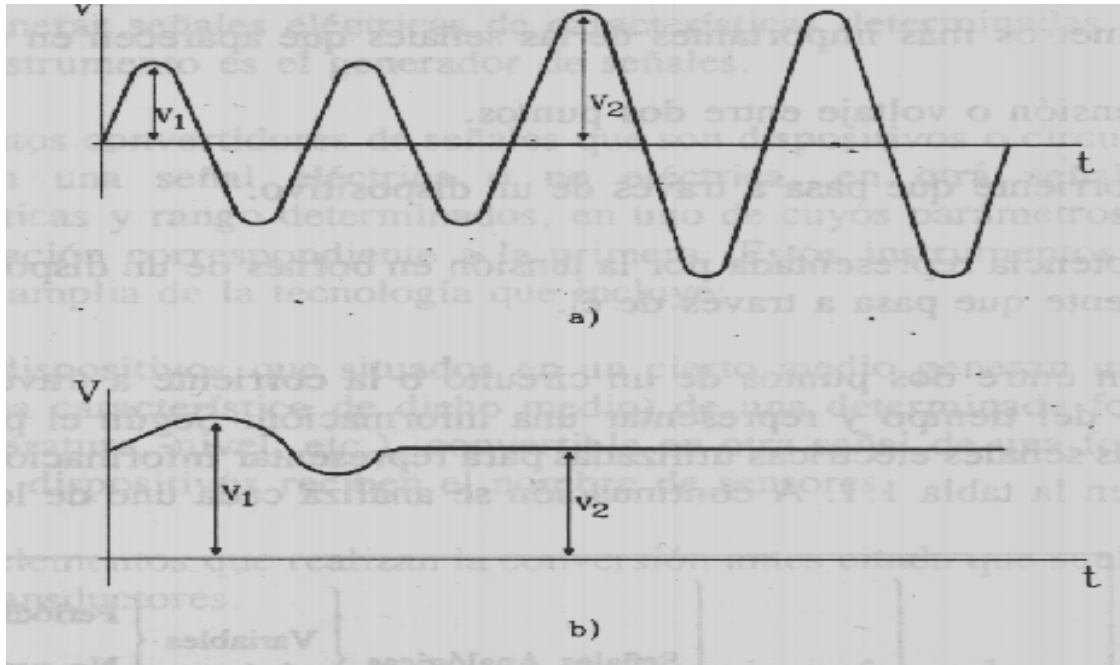



Fig. 10 - Sinais analógicos: (a) Senoidal de frequência constante e (b) Contínuo.

Apesar do avanço tecnológico, a maioria dos sensores produz um sinal de saída analógico; entretanto, já é possível conseguir um apreciável número de sensores com saída digital, como é o caso de medidores de ângulo, posição, nível, etc...

Os sinais digitais são aqueles que estabelecem um número finito de estados entre os valores máximos e mínimo do sinal em estudo. O mais utilizado é o código binário, que somente pode ter dois níveis: 0 e 1. Uma variável binária recebe o nome de "bit". Dessa forma, para representar uma informação (sinal) se necessita de um certo número de variáveis binárias dependendo da variável e da precisão pretendida. As "n" variáveis binárias podem ser apresentadas de duas formas diferentes":

a) em Série : Mediante uma sequência de níveis de zero e um de um sinal digital. Na fig. 2 se indica um sinal digial binário que representa o número 10011 no sistema de numeração binário. Este formado recebe o nome de "série".

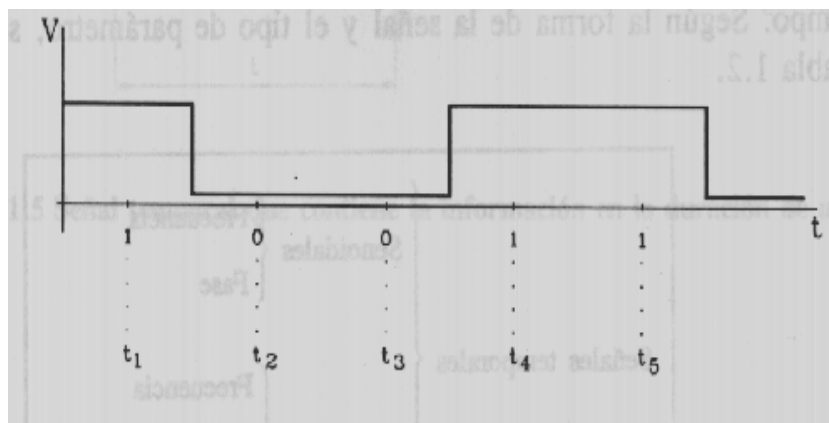



Fig. 11 - Sinal binário no formato série.

b) - em Paralelo: Mediante outros tantos sinais binários independentes. Assim, tem-se o número 10011 num único instante de tempo t_1. Em instantes sucessivos podem ser formados números diferentes (ex: 01010 em t_2, na Fig. 3).

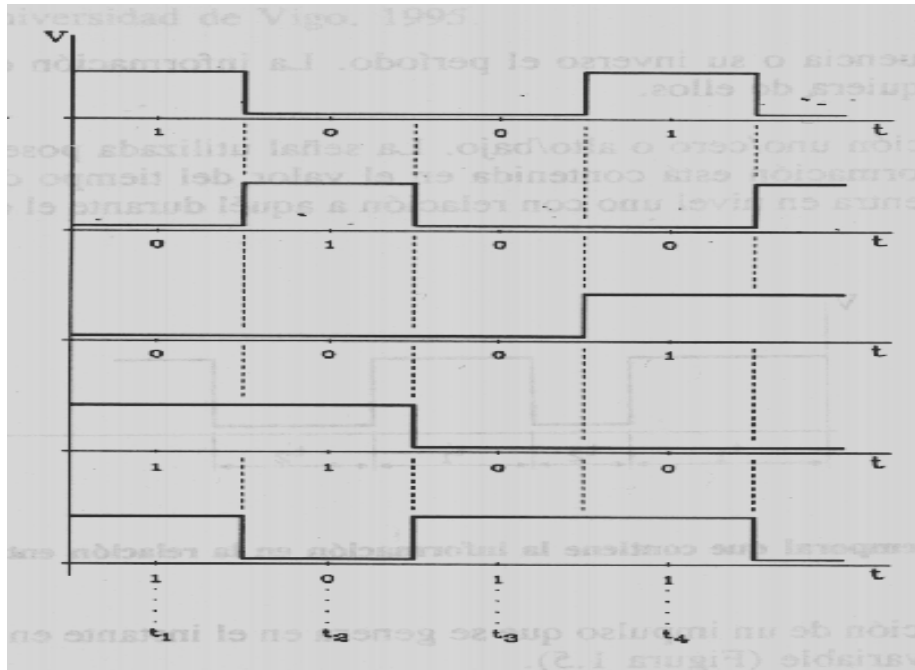



Fig. 12 - Sinal digital em formato “paralelo”

O formato “serial” é usado quando é utilizado só um fio, como no caso do “mouse” ou uma única linha de transmissão (fibra ótica, por exemplo) e o formato “paralelo” pode ser encontrado no caso das impressoras.

O conversor A/D

Conforme foi salientado no ítem anterior, os dados digitais que se utilizam na instrumentação moderna estão baseados em níveis de sinais que se restringem a dois estados, ou seja, os valores ***“binários***” representados pelos valores 0 e 1. Estes níveis binários 0 e 1, são conhecidos como ***“bits”*** e um grupo de bits recebe o nome de “palavra” . Assim, uma palavra poderia ser 0101, palavra que contém 4 bits. A posição dos bits na palavra tem o significado de que o bit menos significativo (LSB) é o último da direita e o bit mais signficativo (MSB) está mais à esquerda da palavra. O valor dos bits numa palavra é:

$$2^{N-1}...2^4\ 2^3\ 2^2\ 2^1\ 2^0$$

MSB LSB

Desta forma, o número 0101 é o número obtido pela soma desde 2^0 até 2^3, ou seja, 5. O número de níveis que um sinal analógico pode ser subdividido está determinado pelo

número de bits da palavra. Por exemplo, se tem-se N bits haverà 2^N níveis. Consequentemente, uma palavrade 4 bits tem 2^4 níveis, ou seja, 16 níveis. A Fig. 4 mostra um sinal analógico de 0 a 1,5 V, numa palavra de 4 bits. Se não tem sinal todos os bits na palavra são 0. Quando a tensão de entrada é 0,1V, o primeiro bit é 1. Quando a tensão é 0,2V, o primeiro bit muda para 0 e o segundo muda para 1. Cada aumento de 0,1V na entrada resulta na soma de 1 bit na palavra. As regras básicas para soma de núemros binários são:

$$0 + 0 = 0 \ ; \quad 0 + 1 = 1 \ ; \quad 1 + 1 = 10$$

Entrada en V	Palabra				Señal
0,0	0	0	0	0	
0,1	0	0	0	1	
0,2	0	0	1	0	
0,3	0	0	1	1	
0,4	0	1	0	0	
0,5	0	1	0	1	
0,6	0	1	1	0	
0,7	0	1	1	1	
0,8	1	0	0	0	
0,9	1	0	0	1	
1,0	1	0	1	0	
1,1	1	0	1	1	
1,2	1	1	0	0	
1,3	1	1	0	1	
1,4	1	1	1	0	
1,5	1	1	1	1	

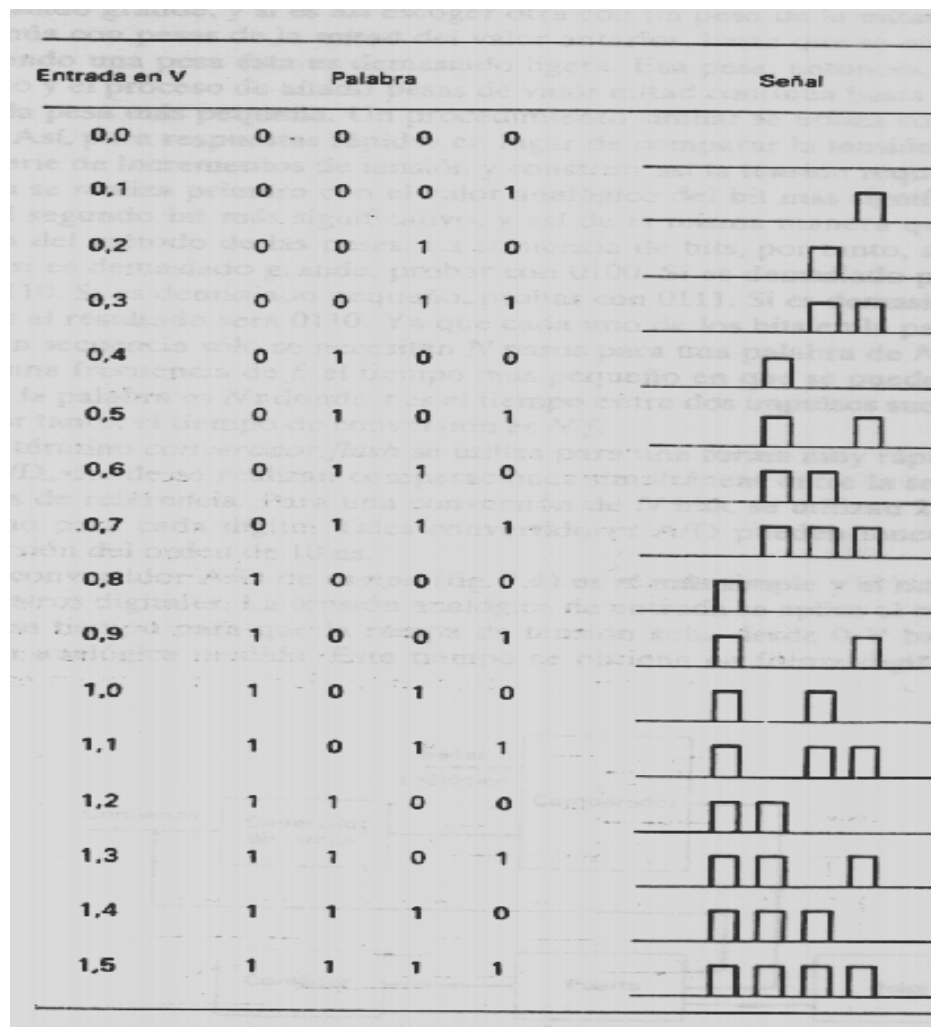



Fig. 13 - Conversão analógico/digital.

Com a conversão de 4 bits, o menor sinal de entrada que produzirá uma mudança na saída binária é 0,1V. Isso é conhecido como ***resolução*** do conversor. Uma mudança menor

que 0,1V na entrada não produzirá nenhuma mudança na saída digital. A resolução pode ser calculada por:

$$S = \frac{1}{2^N}$$

onde N é o número de bits do conversor A/D. Desta forma, um conversor de 8 bits tem sua escala dividida em $2^8 = 256$ partes. Assim, caso um conversor tenha uma escala de 10V (ou seja, funda de escala 10V), a menor voltagem que ele consegue ler é 10V/256partes ≅ 0,04 V ≅ 40 mV. Caso esse conversor (de fundo de escala 10V) fosse 12 bits, a menor voltagem que ele consegue ler é $10V/2^{12}$ ≅ 10V/4096 ≅ 0,0025V ≅ 2,5 mV. O ***tempo de conversão*** é utilizado para especificar o tempo que tarda o conversor em gerar uma palavra digital, quando é jogado um sinal analógico na entrada.

Os tipos de conversor A/D mais comuns encontrados no mercado são: (a) aproximações sucessivas, (b) flash, (c) rampa, (d) dupla rampa e (e) tensã0-frequência. Os conversores de aproximações sucessivas, flash e rampa são exemplos de conversores de “amostragem”; eles proporcionam o valor digital equivalente à tensão analógica no instante em que é realizada a amostragem. Os conversores de dupla-rampa e tensão-frequência são exemplos de conversores integradores, no qual é calculado o valor médio sobre um tempo fixo de medida. Esses conversores demoram mais tempo para fornecer a leitura, porém é menos sensível a ruído, pelo tipo de processamento matemático. Existem diversos fabricantes a nível mundial, dentre os quais salientam-se a National, a Computer Boards e a Omega. No Brasil também existem fabricantes, e pode ser citada a empresa Lynx. A Fig. 5 mostra um conversor da Computer Boards e a Fig. 6 mostra um conversor da Omega.

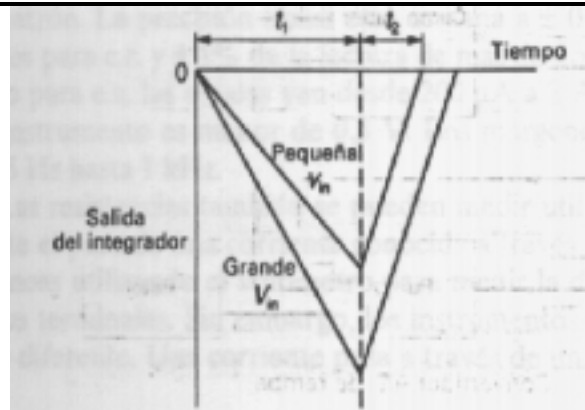
Fig.14 - Conversor A/D PC104-DAS08, da Computer Boards	Fig. 15 - Conversor A/D OMD-5508MF da Omega.

O conversor A/D do tipo aproximações sucessivas faz uma amostragem da tensão analógica de entrada, e depois compara com a tensão que cresce em incrementos até chegar ao valor da tensão de entrada. Este aumento incremental de voltagem é produzido por um "clock" que produz uma sequência regular de impulsos que são contados e convertidos em sinal analógico mediante um conversor analógico/digital. O sinal analógico resultante é comparado com a de entrada e quando resulta superior, os impulsos são cortados e a leitura do contador também, e, portanto, a leitura do contador é o equivalente digital da tensão de entrada analógica. Tipicamente, um medidor de 8 bits terá um tempo de conversão de 10 μs; portanto, a frequência de amostragem típica é da ordem de 1.000 por segundo ou mais. Um voltímetro digital de aproximações sucessivas tem uma das respostas mais rápidas (balanças de laboratório costumam empregar esse tipo de conversor, bem como os conversores usados para aquisição e processamento de dados via computador).

O conversor A/D do tipo ***flash*** é utilizado para conversão muito rápida, como o próprio nome sugere, onde se realizam comparações simultâneas entre o sinal analógico e o sinal de referência. Para uma conversão de *N* bits se utilizam 2^{N-1} comparadores, um para cada dígito. Tais conversores podem ter uma conversão na ordem dos *n*s.

O conversor do tipo ***rampa*** é o mais simples e mais barato dos voltímetros digitais; a voltagem analógica é aplicada ao comparador e se mede o tempo para que a rampa de voltagem suba desde 0V até o valor da tensão analógica de entrada. O tempo é obtido na forma digital mediante um contador de número de impulsos produzidos por um "clock " . Devido à não linearidade da forma de onda da rampa e o fato de não eliminar ruídos, a precisão está, normalmente, limitada a ±0,05%. A frequência de amostragem pode chegar a 1.000 vezes por segundo.

O conversor tipo dupla rampa tem uma entrada de tensão integrada sobre um tempo t_1, igual a um ciclo de frequência da rede (tensão da linha). Ao final de um certo tempo um interruptor desconecta a tensão analógica do integrador, ficando um capacitor carregado. Como $i = dq/dt = q/t_1$, para um regime constante de carga, a carga Q_{in} no capacitor é $it_1 = V_{in}t_1/R$. Então, conecta-se na entrada do integrador uma tensão analógica negativa constante. Depois, mede-se o tempo que o sinal de saída do integrador leva para chegar a zero, ou seja, quando $V_{ref}t_2/R$ é igual a $V_{in}t_1/R$ (Fig. 6). Assim sendo, o tempo t_2 é uma medida indireta de V_{in}.

Fig. 16 - Conversor A/D do tipo dupla rampa.

Esse tipo de conversor A/D tem a vantagem de ser pouco sensível a ruídos e sua precisão pode ficar na faixa dos 0,005%.

No conversor ***tensão-frequência***, a tensão analógica aplicada na entrada é convertida numa série de impulsos cuja frequência é proporcional à amplitude do sinal de entrada. A frequência é determinada contando o número de impulsos existentes num determinado intervalo de tempo conhecido. Não são empregados tão comumente como os de dupla rampa ou de aproximações sucessivas, que são os mais usados comercialmente. Esse tipo de conversor é relativamente lento e praticamente caiu em desuso; era usado, por exemplo, em balanças digitais mais antigas.

Precisão nos instrumentos digitais

Um indicador digital proporciona uma leitura numérica que elimina o erro do operador em termos de interpolação e paralaxe. Os valores lidos normalmente são expressos geralmente entre 3 ½ e 8 ½ dígitos; o ½ se usa na especificação porque o dígito mais sifnificativo pode, unicamente assumir o valor 0 ou 1, enquanto os demais podem assumir valores de 0 a 9. A resolução desses instrumentos é correspondente à mudança de tensão que faz variar o bit menos significativo no display do medidor. Não confundir resolução com erro de medida. Um instrumento pode ser sensível a 0,01 mV . Exemplo: um instrumento pode ler 23,48 mV. Isto não significa que a leitura será (23,48 ± 0,01) mV. Na realidade o erro desses instrumentos é mais complexo de ser calculado é normalmente é uma combinação de fatores. Exemplo: o multímetro Metex M4600(B). Esse instrumento, na escala de 20VDC tem o erro = 0,05% da leitura + 3 dígitos. Desse modo, uma leitura de 100,00 mV teria um erro combinado de: 0,05% de 100,00 mV = 0,05 mV + 3 dígitos= 0,03 mV . O erro combinado seria $[(0,05)^2 + (0,03)^2\}^{1/2} \approx 0,06$ mV (alguns autores preferem simplesmente

somar os dois erros algebricamente). Sempre é importante consultar o manual do fabricante, porque o erro combinado pode mudar em função da escala ou do tipo de variável a ser medida. O mesmo instrumento anterior (Metex), na escala de corrente AC 200 mA teria um erro combinado de = ±1,0% da medida + 10 dígitos.

Os conversores A/D do tipo usado em microcomputador, normalmente têm sua resolução igual ao erro da medida; assim, um instrumento de 12 bits, fundo de escala 100 mV teria uma resolução de 100 mV/4096 partes ≈ 0,025 mV. Ou seja, a menor parte que esse conversor consegue ler é 0,025 mV e o erro de qualquer medida seria esse valor. Exemplo: uma leitura de 2,450 mV, teria um erro de ±0,025mV. Normalmente, o erro dos sensores usados (temperatura, força, pressão, etc..) são bem maiores do que o erro do conversor A/D. Exemplo: um termopar tipo K (temperatura), lendo um sinal na faixa dos 600 C, estaria lendo um sinal na faixa dos 24 mV. O erro somente por parte do termopar seria 0,75% (fora os demais erros), ou seja, algo em torno de 0,18 mV, ou seja, em torno de 4,5 C.° As figuras que seguem mostram alguns exemplos de sinais adquiridos via computador.

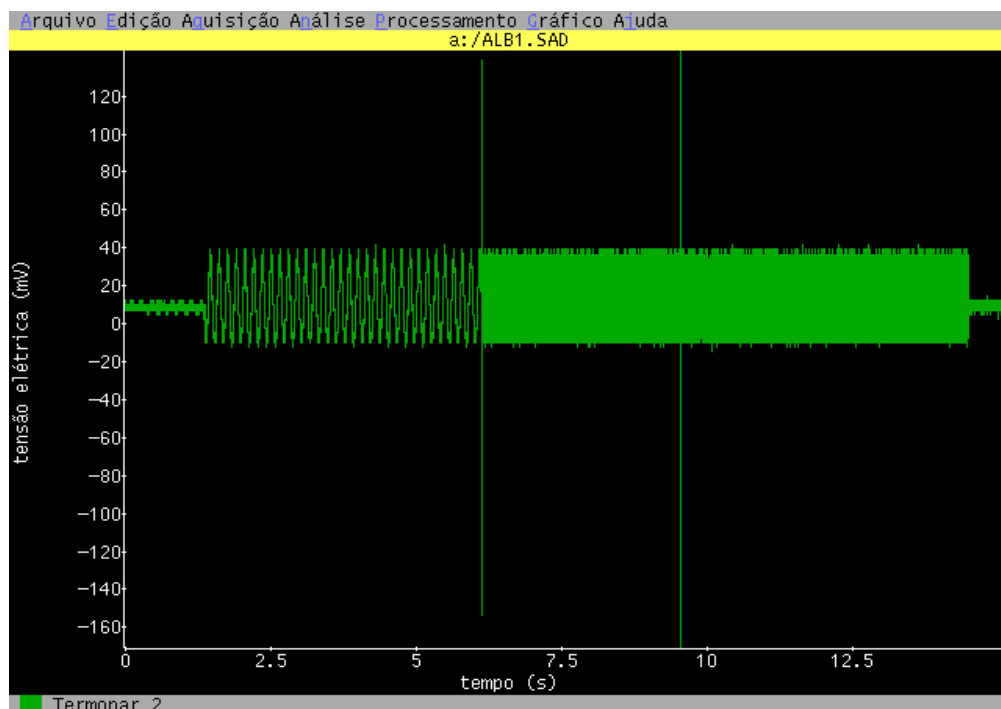



Fig. 17 - Sinal senoidal obtido através de gerador de sinais; a frequência foi variada 2 vezes (aumentada); sinal colhido num conversor A/D marca LYNX, modelo CAD12/36, 60 KHz, 12 bits, software SAD desenvolvido no LMM/UFRGS.

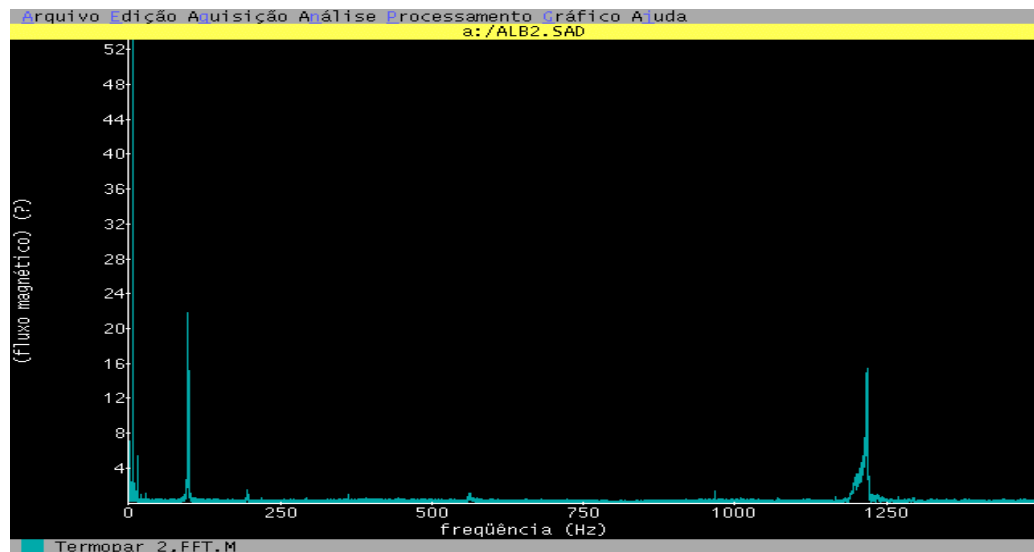



Fig. 18 - Transformada de Fourier do sinal anterior, mostrando as principais componentes de frequência.

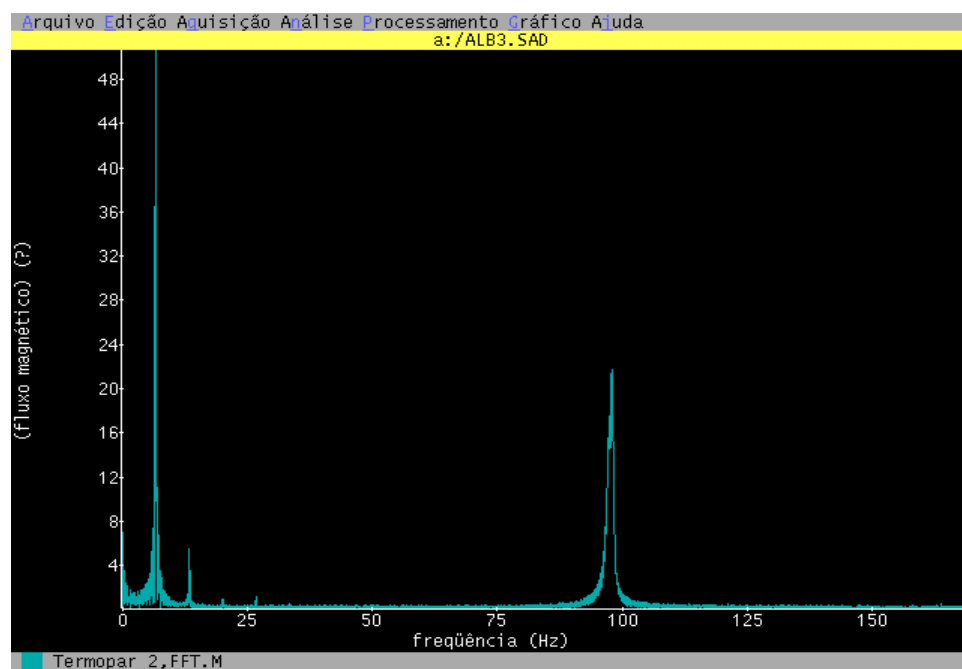



Fig. 19 - Zoom na região de baixa frequência, mostrando uma componente em torno de 10Hz.

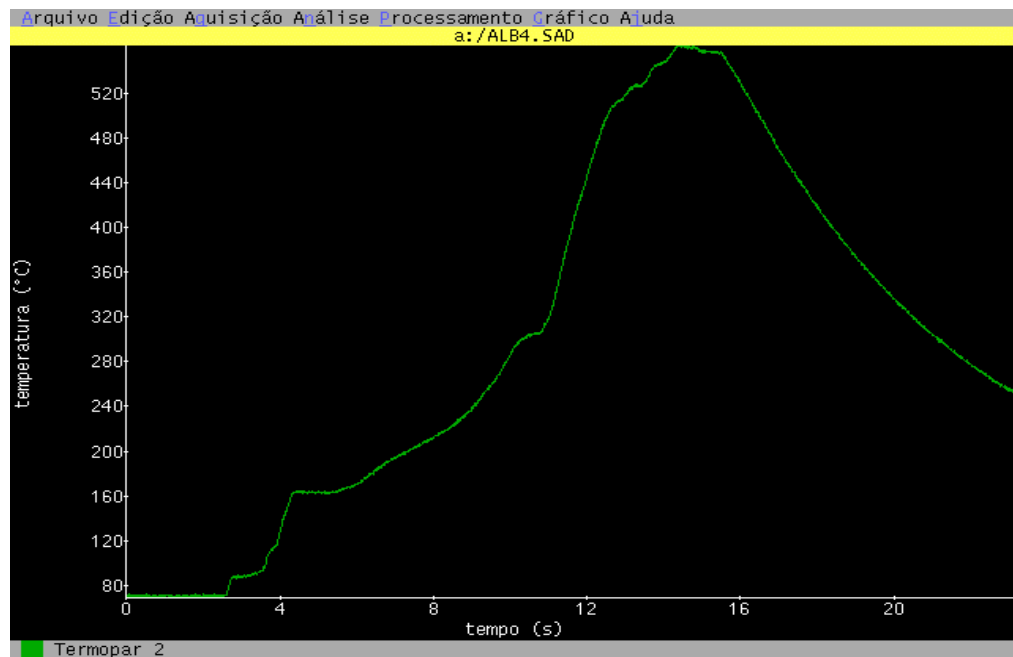



Fig. 20 - Curva de aquecimento e resfriamento de termopar tipo K; mesmo conversor A/D no experimento anterior.

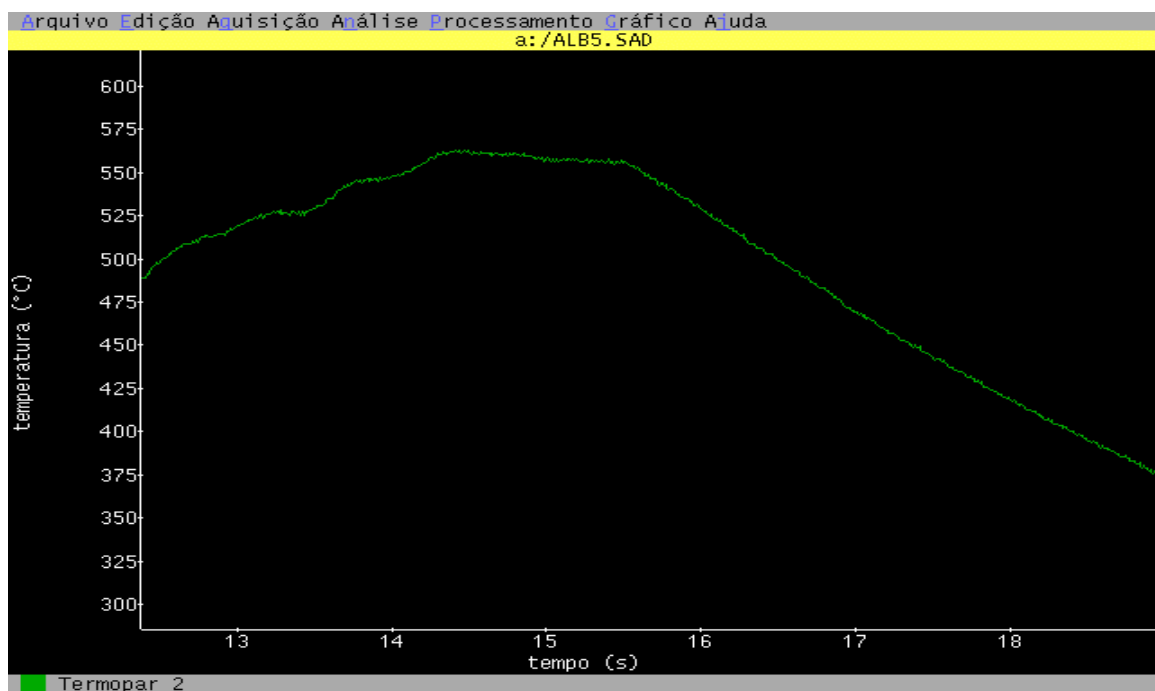



Fig. 21 - Detalhe da curva de aquecimento/resfriamento do exemplo anterior.

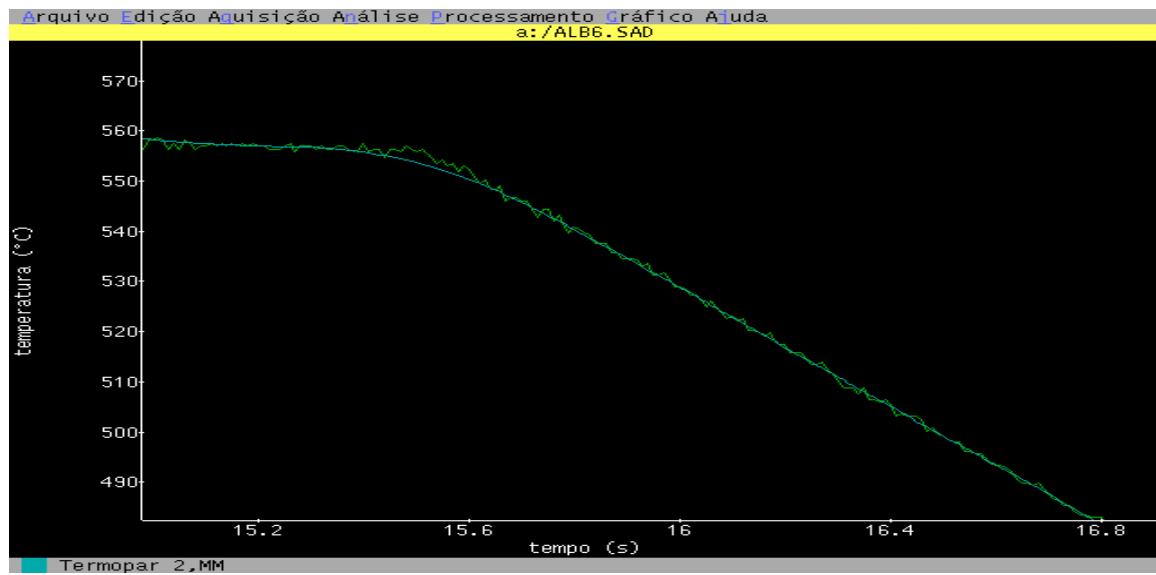



Fig. 22 - Filtragem da curva mostrada na fig. Anterior via filtro “média ponderada” com frequência 1; software SAD.